

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Теоретическое и экспериментальное исследование перспективных источников  
миллиметровых волн на релятивистских электронных пучках»**

**Аспирант:**

Леонтьев Александр Николаевич

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

Абубакиров Эдуард Булатович, доктор физико-математических наук, в.н.с. ИПФ РАН

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.03 Радиофизика

**Форма обучения:** очная

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Продвижение источников электромагнитного излучения мегаваттного и субгигаваттного уровня мощности в миллиметровый диапазон длин волн может способствовать получению новых результатов в целом ряде приложений:

1) Одной из перспективных схем лазеров на свободных электронах рентгеновского диапазона является конфигурация, в которой раскачка электронных сгустков происходит не в статическом поле последовательно расположенных постоянных магнитов, а в поле мощной СВЧ волны (т.н. микроволновый ондулятор) [1 – 3]. При этом отсутствие в миллиметровом диапазоне источников субгигаваттного уровня вынуждает в настоящее время применять схемы на основе длинноимпульсных СВЧ источников, в которых для увеличения полей используются высокочастотные резонаторы [4]. Однако в этом случае обостряются проблемы теплового нагрева и возникновения пробоя, что ограничивает напряженность высокочастотного поля волны накачки и, как следствие, эффективность работы ондулятора. В свою очередь, создание надежных СВЧ источников с уровнем мощности порядка 100 МВт в коротковолновой части миллиметрового диапазона позволит реализовать микроволновые ондуляторы с наиболее оптимальными с практической точки зрения параметрами [5].

2) Образование озона и разрушение фреонов с помощью СВЧ-разряда относится к одним из оптимальных методов восстановления озонового слоя Земли [6]. При этом оценки показывают, что в сантиметровом диапазоне требуемая мощность СВЧ-излучения достигает десятков ГВт [7], что, как минимум, в разы превышает предельные значения мощности существующих источников. Вместе с тем, по мере продвижения рабочей длины волны в миллиметровый диапазон необходимый уровень мощности последовательно снижается до субгигаваттного уровня.

3) В экспериментах по исследованию скорости развития фронта ионизации при развитии разряда в атмосферном газе, инициированного СВЧ излучением, в настоящее время получены скорости ионизации 0.6-0.8 км/с при плотности мощности 30 кВт/см<sup>2</sup> [8] и до 10 км/с при плотности мощности 3 МВт/см<sup>2</sup> [9]. С учетом того, что существующие модели демонстрируют близкую к линейной зависимость скорости фронта ионизации от плотности мощности излучения [10], можно рассчитывать на экспериментальную регистрацию скорости развития фронта ионизации 100 и более км/с при увеличении мощности инициирующего разряд СВЧ-источника до субгигаваттного уровня.

4) Недавние эксперименты показали, что в разряде, поддерживаемом мощным сфокусированным излучением субмиллиметрового диапазона с плотностью мощности 16 МВт/см<sup>2</sup> в неоднородном потоке газа, возможно создание плазмы с концентрацией существенно превышающей критическую [11]. При этом на основе данного эффекта могут быть созданы источники экстремального ультрафиолетового излучения [12 – 13]. В этой связи, представляет интерес использование излучения с еще большими значениями плотности мощности с целью получения более плотной плазмы.

5) В области медико-биологических исследований взаимодействия терагерцового излучения с живыми системы в последние годы формируется направление исследований воздействия терагерцовыми импульсами большой интенсивности [14 – 17]. Такие импульсы характеризуются напряженностями полей в сотни кВ/см, однако, в силу особенностей формирования, имеют короткие длительности. Представляется, что источники субтерагерцового диапазона со сравнимыми значениями напряженностей полей выходного излучения, но при существенно-больших длительностях импульса, могут быть реализованы на базе релятивистских гиротронов.

б) Информационные возможности радиолокационных станций при обнаружении и локализации объекта определяются мощностью и длиной волны используемого СВЧ-излучения. В частности, избирательность станции, которую принято определять как совокупность разрешающих способностей по каждой из координат, быстро растет с уменьшением длины волны как  $\lambda^{-3} - \lambda^{-4}$ . Растет также и точность измерения координат, в частности угловых, что особенно важно для станций, работающих на больших дальностях, для которых линейные ошибки, связанные с измерением угловых координат, много больше, чем ошибки измерения дальности. [18]. Субгигаваттные источники на релятивистских электронных пучках представляют отдельный интерес при реализации радиолокационных методов с использованием последовательности мощных коротких импульсов излучения, следующих друг за другом с достаточно большой частотой [19 – 21].

7) В системах питания мощных ускорителей заряженных частиц, на сегодняшний день, чаще всего используются клистроны сантиметрового диапазона длин волн с мощностью выходного излучения уровня десятков мегаватт [22]. Однако для реализации устройств со сверхвысоким темпом ускорения (1 ГэВ/м и более) их возможностей, по-видимому, недостаточно, и дальнейший прогресс в этом направлении затруднителен без создания качественно-новых источников микроволн. Согласно некоторым оценкам [23], для реализации темпа ускорения 1 ГэВ/м необходим импульсный источник W-диапазона с пиковой мощностью около 200 МВт. Представляется, что такие выходные характеристики могут быть достигнуты в усилителях на релятивистских электронных пучках.

На сегодняшний день, наиболее изученными и проработанными источниками СВЧ-излучения большой мощности являются черенковские приборы (ЛБВ, ЛОВ, генераторы поверхностной волны и т.п.). Так, на длине волны около 3 см несколькими группами достигнута мощность 3-6 ГВт [24 – 26] в импульсах длительностью в десятки нс. Для слабоустойчивых режимов была продемонстрирована пиковая мощность 10-15 ГВт [27] В длинноволновой части миллиметрового диапазона недавно получено излучение в системе четырех синхронизированных ЛОВ, работающих в режиме сверхизлучения, с уровнем мощности 600 МВт в каждой, что соответствует эквивалентной мощности около 10 ГВт [28]. В системах с длительностью в

десятки наносекунд в генераторах черенковского типа в этой части диапазона достигнуты уровни мощности свыше 500 МВт [29, 30]. Дальнейшее продвижение приборов данного класса в область более коротких длин волн в значительной степени сдерживается необходимостью создания гофрированных электродинамических систем с характерными размерами порядка длины волны.

На более коротких волнах наибольший уровень мощности продемонстрирован, по-видимому, лазерами на свободных электронах. На частоте 75 ГГц достигнута мощность генерации до 100 МВт и КПД 4% при ускоряющем напряжении 800 кВ [31]. Однако сложность, дороговизна и размеры этих устройств делают их малоприменимыми в контексте большинства указанных выше приложений.

Другим перспективным классом источников излучения в миллиметровом диапазоне длин волн являются приборы гирорезонансного типа, наиболее проработанными из которых являются гиротроны [32]. Важным их преимуществом перед черенковскими приборами является высокая модовая селективность [33 – 35], позволяющая использовать электродинамические системы с высокой сверхразмерностью. Кроме того, в их конструкции отсутствуют замедляющие системы и другие мелкомасштабные (по сравнению с длиной волны) элементы, присущие электровакуумным СВЧ-приборам с замедленными волнами. Эти достоинства гиротронов позволили им стать наиболее мощными источниками непрерывного миллиметрового излучения. Можно надеяться, что эти же свойства окажутся полезными для освоения мультимегаваттного и субгигаваттного уровня импульсной выходной мощности в миллиметровом диапазоне длин волн.

Достаточно долго считалось, что максимальный КПД гиротрона снижается при переходе от субрелятивистских к существенно релятивистским энергиям частиц. Однако оказалось [36], что достичь высоких значений КПД в гиротроне можно даже в области сильного релятивизма за счет выбора оптимальных длины пространства взаимодействия и продольного распределения амплитуды высокочастотного поля. В частности, в ИПФ РАН были экспериментально продемонстрированы мультимегаваттные гиротроны, запитываемые электронными пучками с энергией 250-300 кэВ, в Ка-диапазоне с КПД 50% [38] и в V-диапазоне с КПД порядка 30% [39], созданные, в значительной мере, с опорой на опыт традиционных слаборелятивистских гиротронов. Дальнейшее продвижение подобных источников в область более высоких частот видится актуальной задачей.

Освоение субгигаваттного уровня выходной мощности с помощью релятивистских гиротронов осложнено необходимостью формировать винтовые электронные пучки с током порядка нескольких килоампер и питч-фактором (отношением поперечных и продольных скоростей электронов) порядка единицы и выше. Очевидно, что традиционная для гиротронов магнетронно-инжекторная пушка с термоэмиссионным катодом для таких целей непригодна

ввиду недостаточной плотности тока эмиссии, и необходимо создавать электронно-оптические системы на основе взрывоэмиссионных инжекторов. В истории микроволновой электроники вплоть до середины 1990х годов предпринимались попытки создания гиротрона на сильноточном релятивистском электронном пучке [40 – 42], однако в реализованных системах использовался либо пучок с низким питч-фактором, либо только центральная часть пучка, сформированная взрывоэмиссионным инжектором. В обоих этих случаях полный КПД прибора оказывался невелик. Принимая во внимание успех в реализации релятивистских гиротронов с термокатодами в длинноволновой части миллиметрового диапазона, достигнутый во многом с за счет прогресса в моделировании электронно-полевого взаимодействия и развития новых подходов к оптимизации параметров гиротронов [36], распространение данных методов на задачу о построении сильноточных гиротронов миллиметрового диапазона представляется весьма перспективным.

Отдельное внимание следует уделить усилителям электромагнитного излучения, устройство которых, как правило, существенно сложнее, чем у приборов автогенерационного типа использующих аналогичный механизм электронно-волнового взаимодействия и обладающих аналогичными выходными характеристиками. Основным требованием, предъявляемым к субгигаваттным микроволновым усилителям, является необходимость достижения больших коэффициентов усиления (30-40 дБ). Оно обусловлено существенным различием между уровнем предполагаемой выходной мощности прибора и уровнем сигнала, подаваемого на вход усилителя, обычно не превышающим 100 кВт (при использовании традиционных источников электромагнитного излучения). При таком усилении, немаловажную роль приобретает задача предотвращения паразитного возбуждения прибора, поэтому большинство мощных усилителей с релятивистскими электронными пучками построено на основе секционированных схем. Секционированные устройства позволяют соединить устойчивость к самовозбуждению, за счет селективной электродинамической связи между секциями, и высокое усиление, достигаемое, по сути, применением в одном приборе нескольких последовательных каскадов усиления на одном электронном пучке. Недостатком такой схемы является необходимость применения электронного пучка с большой рабочей длиной, что значительно усложняет и удорожает систему его фокусировки. Наиболее зарекомендовавшими себя усилителями на релятивистских электронных пучках в сантиметровом диапазоне длин волн являются усилители клистронного типа [43 – 45], однако наличие резонаторов в таких схемах негативно влияет на электропрочность и полосу усиления приборов и делает практически невозможным их продвижение в миллиметровый диапазон длин волн. Более перспективными в этом отношении представляются черенковские приборы с распределенным взаимодействием. Примером может служить усилитель на основе соединения модулирующей ЛОВ и выходной ЛБВ секций. В таких усилителях удавалось получить большое усиление в комбинации с высокой

электропрочностью [46 – 48]. Однако, большое усиление в схеме достигалось в основном за счет модулирующей ЛОВ секции, работающей в режиме регенеративного усиления, то есть при токах пучка  $J^k$  близких к стартовому значению  $J_{st}$ . Амплитуда модуляции в этом режиме определяется степенью близости рабочего тока к стартовому и пропорциональна величине  $G \sim (1 - J^k/J_{st})^{-1}$ , а полоса модуляции обратно пропорциональна этому фактору. Поэтому в таких схемах большое усиление можно получить лишь в достаточно узкой (хотя и более широкой по сравнению с клистроном) частотной полосе, а работа прибора оказывается очень критичной к вариациям параметров электронного потока.

### **Цели диссертации**

1. Изучение особенностей формирования релятивистских винтовых электронных пучков и электронно-волнового взаимодействия в мощных релятивистских гиротронах.
2. Разработка и экспериментальное исследование гиротронов миллиметрового диапазон длин волн с мультимегаваттным и субгигаваттным уровнем мощности выходного излучения. Сравнение экспериментальных результатов с результатами расчетов.
3. Исследование возможностей достижения высоких коэффициентов усиления при взаимодействии релятивистских электронных пучков с высокочастотными полями нескольких собственных волн периодической замедляющей системы в приборах черенковского типа.
4. Разработка макета многопроходного черенковского усилителя с субгигаваттным уровнем мощности выходного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн.

### **Научная новизна результатов**

1. Впервые была экспериментально реализована эффективная одномодовая генерация в релятивистском гиротроне W-диапазона с уровнем мощности выходного излучения более 5 МВт.
2. Разработана и экспериментально реализована электронно-оптическая система, формирующая электронные пучки с параметрами, пригодными для эффективной запитки сильноточных гиротронов на основе магнито-изолированного коаксиального диода с взрывоэмиссионным катодом. При этом в отличие от реализованных ранее систем используется либо полный ток изначального прямолинейного пучка, либо его большая часть.
3. Реализована генерация субгигаваттной мощности в Ka-диапазоне частот в гиротроне с рабочим током, составляющим примерно 40% от предельного тока транспортировки.

4. Предложен новый тип резонаторов для сильноточных гиротронов с сильной селекцией по типу рабочего колебания.
5. Разработан и исследован новый для микроволновой электроники метод одновременного усиления нескольких волн разных типов одним электронным пучком, позволяющий реализовывать устойчивые к паразитному самовозбуждению усилители на сильноточных электронных пучках.

### **Практическая значимость и использование результатов работы**

Проведенные исследования позволили разработать и реализовать ряд макетов источников импульсного излучения миллиметрового диапазона волн с уникальными параметрами. Применение предложенных методов и подходов будет способствовать дальнейшему продвижению мультимегаваттных и субгигаваттных источников электромагнитного излучения в область более высоких частот.

Результаты, представленные в диссертации, использовались при выполнении научно-исследовательских работ, поддержанных грантами РФФИ № 14-02-31643, № 16-08-01001, № 18-08-00926, № 18-38-00725, РФФИ № 14-29-00192.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментальная реализация импульсного релятивистского гиротрона W-диапазона с рекордным сочетанием выходной мощности и КПД
2. Разработка и экспериментальная реализация электронно-оптической системы, формирующей винтовые электронные пучки с мультикилоамперным током, питч-фактором порядка единицы и приемлемым для гиротронов скоростным и позиционным разбросом.
3. Экспериментальная реализация сильноточного гиротрона в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн (Ka-диапазон) с рабочим током, достигающим 40% от предельного значения, и импульсной выходной мощностью, превышающей 100 МВт
4. Разработка и исследование нового типа резонаторов для сильноточных гиротронов, позволяющих освоить большие величины токов инжекции по сравнению с традиционными резонаторами без потерь в электронной эффективности за счет использования моды ТМ-типа в качестве рабочей.
5. Исследование модели нелинейного многоволнового взаимодействия в релятивистских электронных приборах черенковского типа. Разработка макета усилителя с ожидаемым коэффициентом усиления 45 дБ и КПД 35% в Ka-диапазоне на основе исследованного механизма.

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных журналах [A1 – A5] и докладывались на международных конференциях по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2017), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н. Новгород, 2016, Карлсруэ, Германия 2017), Международном семинаре по мощным СВЧ-источникам и их приложениям (Н. Новгород, 2017), Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016, 2018), Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2018), Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2015, 2016, 2018), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н. Новгород, 2019), Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2018), Конкурсе молодых ученых ИПФ РАН (Н.Новгород, 2017 Нижегородской сессии молодых ученых (2016), Научной конференции ННГУ по радиофизике (Н. Новгород 2016, 2018)

## **Личный вклад автора в проведенные исследования**

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A22] получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании взаимодействия релятивистских электронных пучков с электромагнитными полями резонаторов гиротронов и замедляющих систем черенковских приборов, численном моделировании режимов генерации и усиления, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов и статей. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Экспериментальные исследования проводились в составе коллективов установок «Сатурн-F» и «Синус-6» (ИПФ РАН). Обработка результатов эксперимента производилась автором лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

## **Структура и объем диссертации**

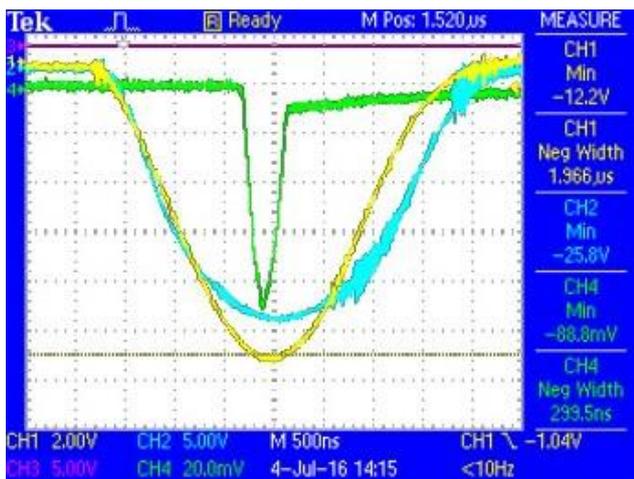
Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка трудов по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 93 страницы, включая 60 иллюстраций, 4 таблицы и список литературы из 106 наименований. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 22 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

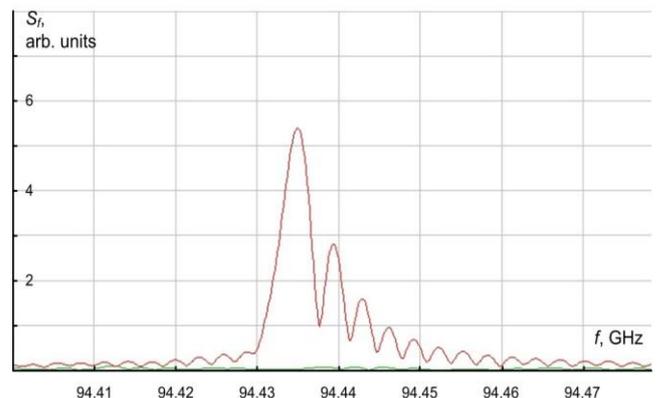
Во введении обоснована актуальность темы, определены цели диссертационной работы, отмечена научная новизна проведенных исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации

В первой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение частоты и мощности выходного излучения в импульсных гиротронах на релятивистских электронных пучках

В п. 1.1. обсуждается расчет и экспериментальная реализация импульсного мультимегаваттного релятивистского гиротрона W-диапазона с термоэмиссионным инжектором. В ходе работы проведена адаптация электронно-оптической системы на базе экспериментального стенда «Сатурн-Ф», ранее используемой для реализации более длинноволновых приборов. Проведен расчет и оптимизация профиля резонатора с целью достижения максимального КПД. Приведены результаты экспериментов, в ходе которых получена устойчивая одномодовая генерация на частоте 94,4 ГГц с пиковой импульсной мощностью более 5 МВт.



(a)



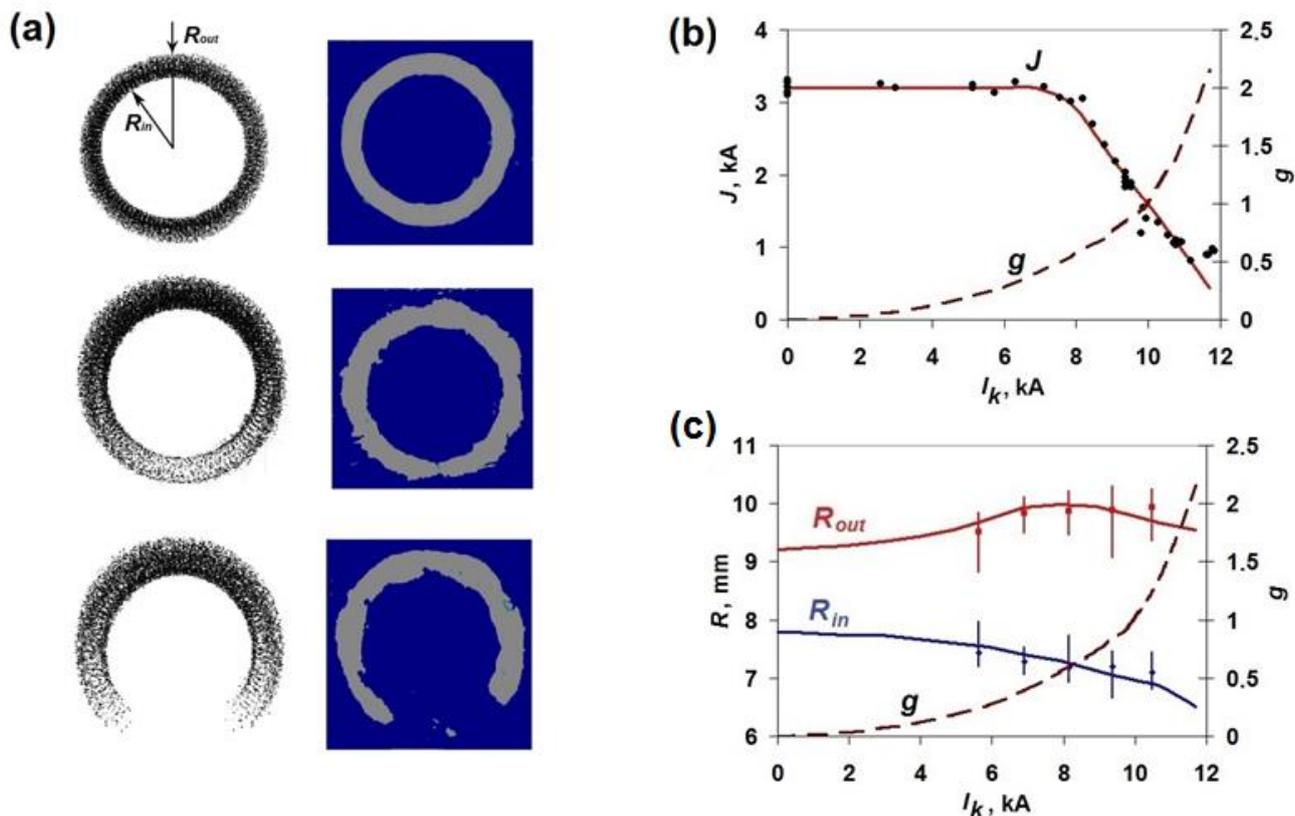
(b)

**Рис. 1:** (a) осциллограммы импульсов, соответствующие ускоряющему напряжению 244кВ (желтая кривая), току пучка 103 А (голубая кривая) и мощности выходного излучения 5.6 МВт (зеленая кривая) и (b) частотный спектр выходного сигнала.

В п. 1.2. рассматривается гиротрон Ka-диапазона с мультикилоамперным электронным пучком и субгигаваттной выходной мощностью.

Описывается моделирование электронно-оптической системы на основе магнито-изолированного коаксиального диода с взрывоэмиссионным катодом и системы раскочки поперечных скоростей в неадиабатическом магнитном поле короткой катушки с током (кикера), направленным противоположно относительно тока ведущего соленоида. Приведены результаты экспериментального исследования ЭОС с использованием оригинального метода диагностики параметров винтовых электронных пучков большой интенсивности, основанного на применении

контрастных электронных мишеней и детальном сопоставлении модельных и экспериментальных профилей потока. Показано, что указанным способом возможно формирование мультикилоамперных винтовых пучков с характерными значениями пичч-фактора порядка единицы и скоростным и позиционным разбросом, приемлемым для селективного и эффективного возбуждения рабочей моды гиротрона миллиметрового диапазона длин волн.

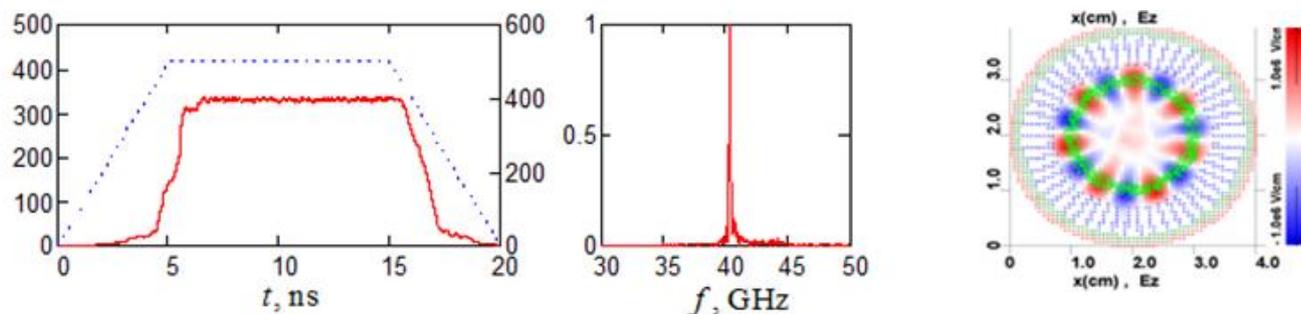


**Рис. 2:** (a) Сравнение расчетного положения частиц в области коллектора с отпечатками пучка на мишени и расчетные (непрерывная кривая) и экспериментальные (точки) зависимости (b) коллекторного тока и (b) внутреннего и внешнего радиусов отпечатка пучка на мишени от величины тока кикера. Пунктирной кривой на обоих графиках показаны значения расчетного пичч-фактора пучка.

Приводятся результаты моделирования и оптимизации резонатора гиротрона с рабочей частотой 30 ГГц на моде  $TE_{3,2}$ . Демонстрируются результаты первых экспериментальных исследований сильноточного гиротрона, в результате которых была достигнута пиковая мощность выходного излучения более 100 МВт.

Обсуждается возможность повышения рабочего тока при сохранении электронной эффективности за счет использования в качестве рабочей моды ТМ-типа. Предлагается новый тип резонатора с сильной дискриминацией ТЕ-мод, в котором регулярная часть образована совокупностью продольных металлических пластин, разделенных широкими щелями. В такой системе нарушаются радиальные стеночные токи, соответствующие модам ТЕ-типа, в то время, как продольные токи, соответствующие поперечно-магнитным модам значительных нарушений

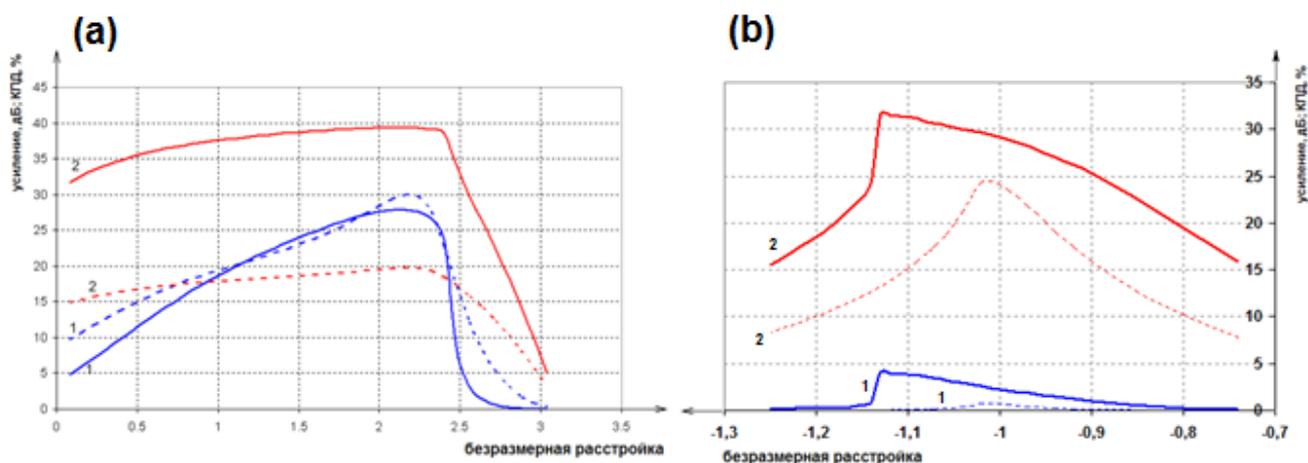
не претерпевают. Селективные и резонансные свойства такого резонатора подтверждаются путем численного расчета и измерения электродинамических характеристик изготовленного прототипа. С помощью РИС-моделирования взаимодействия сильноточного электронного пучка с полем продольно-щелевого резонатора показана возможность достижения выходной мощности более 300 МВт на частоте 40 ГГц.



**Рис.3:** Результаты моделирования взаимодействия сильноточного электронного пучка с модой  $TM_{7,1}$  продольно-щелевого резонатора: (слева) огибающая выходного микроволнового импульса на фоне импульса ускоряющего напряжения, (в центре) спектр выходного излучения, (справа) поперечная структура резонатора и продольной компоненты электрического поля.

Во второй главе описывается принцип одновременного взаимодействия нескольких собственных волн в сверхразмерных электродинамических системах с одним электронным пучком.

В п. 2.1 с помощью модификации известной модели релятивистской лампы бегущей волны черенковского типа, в которой с электронным пучком взаимодействуют две волны с левым и правым вращением поперечной структуры, рассмотрены особенности и основные характеристики параллельного многоволнового усиления. Показано, что рассмотренный подход при последовательной электродинамической связи рабочих волн дает возможность достичь в релятивистской лампе бегущей волны высокого коэффициента усиления при сохранении типичных значений других параметров (электронной эффективности, полосы усиления и др.)



**Рис.4:** Результаты моделирования двухпроходного взаимодействия в релятивистских усилителях на основе ЛБВ (а) и ЛОВ (б). На графиках показана зависимость электронного КПД (кривые 1) и коэффициента усиления (кривые 2) от безразмерной расстройки синхронизма для однопроходного (пунктирные кривые) и двухпроходного (непрерывные кривые) вариантов.

В п. 2.2 на основе нестационарной модели исследуется принцип параллельного усиления волн разных типов применительно к релятивистской ЛОВ в режиме регенеративного усиления. Показано, что использование принципа параллельного усиления позволяет существенно увеличить коэффициент усиления и расширить полосу усиления прибора по сравнению с однопроходной ЛОВ. Обсуждаются элементы электродинамической системы, с помощью которой можно организовать последовательную связь между циклами усиления. Предложен вариант использования принципа параллельного усиления в мощных секционированных усилителях.

В п. 2.3 приведены результаты разработки многопроходного усилителя на основе двухпроходной ЛБВ с модулирующим резонатором в Ка-диапазоне с первым циклом усиления на моде  $E_{01}$  и вторым на гибридной моде  $HE_{11}$ . Построена дополненная модель взаимодействия с учетом влияния высокочастотного пространственного заряда. Показано, что при оптимальных параметрах возможна реализация прибора с коэффициентом усиления порядка 44,5, что для входного сигнала с мощностью 20 кВт соответствует выходной мощности более 560 МВт. Электронный КПД в оптимальном режиме достигает величины порядка 28%. Описаны основные компоненты электродинамической системы, в которой организуются два прохода усиления и вывод мощности на моде  $HE_{11}$ , которую достаточно просто преобразовать в гауссов волновой пучок.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан и реализован экспериментально импульсный релятивистский гиротрон с рабочей частотой 94,4 ГГц и мощностью выходного излучения более 5 МВт при КПД порядка 20%, что является рекордным сочетанием как для данного класса приборов, так и для микроволновых генераторов в целом.
2. Разработана и испытана экспериментально электронно-оптическая система с взрывоэмиссионным катодом, способная формировать винтовые электронные пучки с энергией частиц 500 кэВ, током до 2 кА, питч-фактором порядка 1 и разбросом по поперечным скоростям порядка 40%
3. Разработан и экспериментально реализован сильноточный релятивистский гиротрон Ка-диапазона с рабочим током, составляющим около 40% от предельного. В результате первых экспериментальных тестов получено выходное излучение с импульсной мощностью более 100 МВт.
4. Предложена модификация сильноточного гиротрона позволяющая осваивать большие величины рабочего тока при сохранении достаточно высокого КПД за счет использования рабочей моды ТМ-типа. Обсуждается новый тип представляющего собой совокупность

продольных пластин, разделенных щелями, обеспечивающий сильную дискриминацией ТЕ-мод. Путем численных расчетов и экспериментальных тестов исследованы селективные и резонансные свойства данной системы. Предполагается, что после внедрения предложенных решений возможна реализация эффективного источника микроволн Ка-диапазона с выходной мощностью около 300 МВт.

5. Исследован метод повышения коэффициента усиления в сильноточных релятивистских усилителях черенковского типа за счет одновременного взаимодействия двух волн с различной азимутальной структурой с одним электронным пучком и организации последовательной электродинамической связи между ними. Построены системы нелинейных уравнений, описывающих электронно-волновое взаимодействие с учетом неоднородности по азимутальному углу для релятивистских ЛБВ и ЛОВ. Для данных систем продемонстрировано повышение коэффициента усиления до величины  $K^2$ , где  $K$  соответствует однопроходному варианту без значительного ущерба для эффективности взаимодействия и ширины полосы усиления.
6. Проработаны основные компоненты усилителя Ка-диапазона на основе двухпроходной ЛБВ. Расчетная выходная мощность прибора составляет 580 МВт, что соответствует коэффициенту усиления 44.5 дБ для входного сигнала мощностью 20 кВт. Ожидаемая эффективность взаимодействия 28,3%.

### **Список трудов автора по теме диссертации**

- A1. Абубакиров Э.Б., Леонтьев А.Н. О параллельном усилении в электронных системах с распределенным взаимодействием // Радиотехника и электроника. 2015, Т.60, №7, С.754-758.
- A2. Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G., Guznov Yu.M., Kornishin S.Yu., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A.S., Semenov E.S., Tarakanov V.P., Zavolsky N.A., Zapevalov S.A., Zapevalov V. E. W-Band 5 MW Pulse Relativistic Gyrotron // IEEE Trans. on Electron. Devices, 2017, Vol. 64 Iss. 4.
- A3. Абубакиров Э.Б., Колюшков А.П., Леонтьев А.Н. Релятивистская лампа обратной волны с параллельным взаимодействием волн // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 5, С. 385–393.
- A4. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fedotov A.E., Leontyev A.N., Rozental R.M., Tarakanov V.P. Electron-optical system for a high-current Ka-band relativistic gyrotron // Physics of Plasmas. 2019. V.26. Art. no. 033302.
- A5. Вилков М. Н., Леонтьев А. Н., Розенталь Р. М., Тараканов В. П. Моделирование сильноточного релятивистского гиротрона на ТМ-моде продольно-щелевого резонатора. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2.

- A6. Абубакиров Э.Б., Леонтьев А.Н. Параллельное взаимодействие в релятивистских электронных приборах черенковского типа // III Всероссийская Микроволновая Конференция 25-27 ноября 2015г. Москва. С.23-27.
- A7. Абубакиров Э.Б., Денисов Г.Г., Гузнов Ю.М., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Запевалов С.А., Леонтьев А.Н., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С. Экспериментальная реализация импульсного 3-мм релятивистского гиротрона с мультимегаваттным уровнем выходной мощности // Труды XX научной конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика. Нижний Новгород, 12-20 мая 2016 г. с.56-57.
- A8. Абубакиров Э.Б., Леонтьев А.Н. О параллельном усилении в релятивистской ЛОВ // XXI Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки. Материалы докладов. Княгинино. НГИЭУ. 2016 г. С. 26-27.
- A9. E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G., Guznov Yu. M., Kornishin S.Yu., Leontyev A.N., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A.S., Semenov E.S., Zavolsky N.A., Zapevalov S.A., Zapevalov V.E. Experimental realization of pulsed 3-mm relativistic gyrotron with multi-megawatt output power // 28th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons. 2016. Nizhny Novgorod
- A10. Абубакиров Э.Б., Денисов Г.Г., Гузнов Ю.М., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Запевалов С.А., Леонтьев А.Н., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С. Импульсный 3-мм релятивистский гиротрон с мультимегаваттным уровнем выходной мощности» // IV Всероссийская Микроволновая Конференция 23-25 ноября 2016 г. Москва. С.120-124.
- A11. Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G., Guznov Yu. M., Kornishin S.Yu., Leontyev A.N., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A.S., Semenov E.S., Zavolsky N.A., Zapevalov S.A., Zapevalov V.E. Experimental realization of W-band relativistic gyrotron with 5 MW output power // IVEC 2017 London, UK.
- A12. Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G., Guznov Yu. M., Kornishin S.Yu., Leontyev A.N., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A.S., Semenov E.S., Zavolsky N.A., Zapevalov S.A., Zapevalov V.E. Experimental realization of W-band relativistic gyrotron with 5 MW output power // 29th Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons. 2017. Karlsruhe-Stuttgart-Garching, Germany.
- A13. Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G., Guznov Yu. M., Kornishin S.Yu., Leontyev A.N., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A.S., Semenov E.S., Zavolsky N.A., Zapevalov S.A., Zapevalov V.E. W-band 5 MW pulse relativistic gyrotron: development and experimental implementation // EPJ Web of Conferences 149, 04026 (2017).

- A14. Абубакиров Э.Б., Денисов Г.Г., Гузнов Ю.М., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Запевалов С.А., Леонтьев А.Н., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С., Экспериментальное исследование импульсного 3-мм релятивистского гиротрона с мультимегаваттным уровнем выходной мощности, 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 10—16 сентября 2017 г. Севастополь, Крым, Россия, с 1142-1148.
- A.15 Абубакиров Э.Б., Вилков М.Н., Гузнов Ю.М., Леонтьев А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Федотов А.Э. Новый тип резонатора для сильноточных гиротронов с сильной дискриминацией TE-мод // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, Саратов. 5–10 февраля 2018.
- A16. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П., Леонтьев А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Тараканов В.П., Федотов А.Э. «Разработка сильноточного гиротрона диапазона 30 ГГц» // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, Саратов. 5–10 февраля 2018.
- A17. Гузнов Ю.М., Абубакиров Э.Б., Вилков М.Н., Денисенко А.Н., Леонтьев А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Федотов А.Э. Разработка и экспериментальное исследование электроннооптической системы сильноточного релятивистского гиротрона с рабочей модой ТМ-типа// Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолоборатории. Нижний Новгород: ННГУ, 15-29 мая 2018, С . 99.
- A18. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П., Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Федотов А.Э. Разработка и тестирование электронно-оптической системы импульсного сильноточного релятивистского гиротрона // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей VII Всероссийской конференции. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2018. С.197-200.
- A19. Абубакиров Э.Б., Вилков М.Н., Гузнов Ю.М., Леонтьев А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Федотов А.Э. Новый тип резонатора для сильноточных гиротронов с сильной дискриминацией TE-мод // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей VII Всероссийской конференции. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2018. С.696-698.
- A20. Абубакиров Э. Б., Денисенко А.Н., Леонтьев А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Федотов А.Э. Импульсный сильноточный релятивистский гиротрон Ka-диапазона // Proceedingd of the 28th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2018) Sevastopol, Russian Federation, September 9-15, 2018.
- A21. Вилков М.Н., Гузнов Ю.М., Леонтьев А.Н., Леонтьев Н.В., Розенталь Р.М. Численное моделирование продольно-щелевого резонатора сильноточного релятивистского

гиротрона с рабочей модой ТМ-типа // VI Всероссийская Микроволновая Конференция 28-30 ноября 2018 г. Москва, С.84-87.

- A22. Леонтьев А.Н., Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Ошарин И.В., Розенталь Р.М., Федотов А.Э. Сильноточный релятивистский гиротрон Ка-диапазона длин волн: моделирование и экспериментальное исследование // XI Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн 25-28 февраля 2019 г. Нижний Новгород С.54.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang C., Shumail M., Tantawi S., Neilson J., Pellegrini C. Electron dynamics and transverse-kick elimination in a high-field short-period helical microwave undulator // *Appl. Phys. Lett.* 101, 161102 (2012).
2. Kuzikov S.V., Savilov A.V., Vikharev A.A. Flying radio frequency undulator // *Appl. Phys. Lett.* 105, 033504 (2014).
3. Zhang L., He W., Clarke J., Ronald K., Phelps A. D. R., Cross A. W. Microwave Undulator Using a Helically Corrugated Waveguide // *IEEE Trans. on Electron Devices.* Vol. 65 , Iss. 12, 2018.
4. Toufexis F., Dolgashev V. A., Limborg-Deprey C., Tantawi S. G. Compact linac-driven light sources utilizing mm-period RF undulators // // *Proc. SPIE 10387, Advances in Laboratory-based X-Ray Sources, Optics, and Applications VI*, 1038704 (23 August 2017).
5. Винокуров Н.А., Левичев Е.Б. Ондуляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений // *УФН* 185, 917 (2015)
6. Беккер С. З., Доронин А. П., Козлов С. И. Критический анализ активных методов восстановления озонового слоя Земли // *Геомагнетизм и аэрономия* 57, 676 (2017).
7. Гуревич А.В., Литвак А.Г., Вихарев А.Л., Иванов О.А., Борисов Н.Д., Сергейчев К.Ф. Искусственная ионизованная область как источник озона в стратосфере // *УФН* 170, 1181 (2000)
8. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосекова В.Д., Колик Л.В., Кончекова Е.М., Косый И.А., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. Разряд в атмосфере в гауссовом пучке подпороговых миллиметровых волн // *Письма в ЖЭТФ* 107, 223 (2018).
9. Hidaka Y., Choi E.M., Mastovsky I., Shapiro M.A., Sirigiri J.R., Temkin R.J., Edmiston G.F., Neuber A.A., Oda Y. Plasma structures observed in gas breakdown using a 1.5 MW, 110 GHz pulsed gyrotron // *Phys. Plasmas* 16, 055702 (2009).

10. Nakamura Y., Komurasaki K., Fukunari M., Koizumi H. Numerical analysis of plasma structure observed in atmospheric millimeter-wave discharge at under-critical intensity // *J. Appl. Phys.* 124, 033303 (2018)
11. Водопьянов А.В., Разин С.В., Сафронова М.И., Сидоров А.В., Фокин А.П. Концентрация плазмы разряда, поддерживаемого в неоднородном потоке газа мощным излучением терагерцового диапазона частот // *Письма в ЖТФ* Т. 43, вып. 10 (2017).
12. Abramov I.S., Gospodchikov E.D., Shalashov A.G. Extreme-Ultraviolet Light Source for Lithography Based on an Expanding Jet of Dense Xenon Plasma Supported by Microwaves // *Phys. Rev. Appl.* 10, 034065 (2018).
13. Shalashov A.G., Vodopyanov A.V., Abramov I.S., Sidorov A.V., Gospodchikov E.D., Razin S.V., Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Glyavin M.Yu., Golubev S.V. Observation of extreme ultraviolet light emission from an expanding plasma jet with multiply charged argon or xenon ions // *Appl. Phys. Lett.* 113, 153502 (2018).
14. Titova L.V., Ayesheshim A.K., Golubov A., Fogen D., Rodriguez-Juarez R., Hegmann F.A., Kovalchuk O. Intense THz pulses cause H2AX phosphorylation and activate DNA damage response in human skin tissue // *Biomed. Opt. Express* Vol.4, Iss. 4, P.559 (2013).
15. Vernier, P.T., Levine, Z.A., Ho, MC, Xiao Sh., Semenov Iu. Pakhomov A.G. Picosecond and Terahertz Perturbation of Interfacial Water and Electroporation of Biological Membranes // *J Membrane Biol.* Vol.248, Iss.5, P. 837 (2015).
16. Hough C.M., Purschke D.N., Huang Ch., Titova L.V., Kovalchuk O., Warkentin B.J., Hegmann F.A. Biological effects of intense THz pulses on human skin tissue models // *IRMMW-THz 2017*.
17. Sitnikov D.S., Plina I.V., Pronkin A.A., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Zurina I.M., Gorkun A.A., Kosheleva N.V. Studying the effect of high-power coherent terahertz pulses on mesenchymal stem cells // *IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Series* 1147, 012060 (2019).
18. Толкачев А.А., Егоров Е.Н., Шишлов А.В. О некоторых тенденциях развития радиолокационных и связанных систем // *«Радиотехника»*, 2006, №4, С. 5–11
19. Бункин Б.В., Гапонов-Грехов А.В., Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Осипов М.Л., Отливанчик Е.А., Петелин М.И., Прохоров А.М., Ростов В.В., Сараев А.П., Сисакян И.П., Сморгонский А.В., Суворов В.А. Радиолокатор на основе СВЧ-генератора с релятивистским электронным пучком // *Письма в ЖТФ*, Т.18, вып.9, 1992г.
20. Manheimer W.M., Mesyats G.A., Petelin M.I. Super-High-Power Microwave Radars // *Strong Microwaves in Plasmas, Proceedings of the International Workshop. Moscow – Nizhny Novgorod – Moscow 1993.*

21. Blyakhman A., Clunie D., Harris R., Mesyats G., Petelin M., Postoenko G., Wardrop B., Nanosecond Gigawatt Radar: Indication of Small Targets Moving Among Heavy Clutters // 2007 IEEE Radar Conference.
22. Caryotakis G. Development of X-Band Klystron Technology at SLAC /// 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, B.C., Canada, May 12–16, 1997.
23. Whittum D.H. Millimeter-wave drivers for future linear colliders // international conference on infrared and millimeter waves, Wintergreen, VA (US), 1997.
24. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., et al. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1991. 296 с.
25. Benford J., Swegle J., Schamiloglu E. High power microwaves. Second edi. Taylor & Francis, 2007. 552 p.
26. Xiao R.Z., Zhang X.W., Zhang L.J., Li X.Z., Zhang L.G., Song W., Hu Y.M., Sun J., Huo S.F., Chen C.H., Zhang Q.Y., Liu G.Z. Efficient generation of multi-gigawatt power by a klystron-like relativistic backward wave oscillator // Laser and Particle Beams (2010), 28, P. 505–511.
27. Bugaev S.P., Cherepenin V.A., Kanavets V.I., Klimov A.I., Kopenkin A.D., Koshelev V.I., Popov V.A., Slepkov A.I. Relativistic multiwave Cherenkov generators // IEEE Trans. On Plasma Sci. 1990, Vol.18, Iss. 3, P.525.
28. Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A., Mesyats G.A., Pedos M.S., Phelps A.D.R., Romanchenko I.V., Rostov V.V., Rukin S.N., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Yalandin M.I., Zotova I.V. Generation of Electromagnetic Fields of Extremely High Intensity by Coherent Summation of Cherenkov Superradiance Pulses // Phys. Rev. Lett. 115, 114802 (2015)
29. Братман В.Л., Губанов В.П., Денисов Г.Г.и др. Экспериментальное исследование секционированного СВЧ генератора с релятивистским электронным пучком // Письма в ЖТФ. 1988. Т.14, №1. С.9-13.
30. Wu D., Shu T., Ju J., Peng Sh. Gigawatt-class radiation generated by a Ka-band overmoded Cherenkov-type high power millimeter wave generator // Review of Scientific Instruments 86, 084706 (2015)
31. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Сеницкий С.Л., Степанов В.Д., Тумм М. Генерация мощного узкополосного излучения 75 GHz в мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью // Письма в ЖТФ, 2013, Т. 39, в. 18, С.8-16
32. Flyagin V.A., Garonov A.V., Petelin M.I., Yulpatov V.K. The Gyrotron // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1977. Vol.25 , Iss. 6, P. 514–521.

33. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И. Селекция мод в высокочастотных релятивистских электронных генераторах с распределенным взаимодействием // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. (Материалы II Всесоюзного семинара г. Томск 1980 г.) Горький 1981. С.62.
34. Власов С.Н., Орлова И.М., Петелин М.И. Резонаторы гиротронов и электродинамическая селекция мод // Гиротрон. Сборник научных трудов. Горький 1981 г.С.62
35. Петелин М.И. Электронная селекция мод в гиротроне // Гиротрон. Сборник научных трудов. Горький 1981 г. С.77
36. Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А. О повышении КПД релятивистского гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т.44, №.4. С.345.
37. Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Нечаев В.Е., Петелин М.И., Розенталь Р.М. Десятимегаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см И КПД 50% // /Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, №. 10. С. 914.
38. Завольский Н.А.,Иляков Е.В., Калынов Ю.К., Кулагин И.С.1, Мануилов В.Н., Шевченко А.С. Мощный релятивистский гиротрон миллиметрового диапазона длин волн на второй циклотронной гармонике // Изв. вузов. Радиофизика.2018 Т.61, №. 1. С. 44.
39. Bratman V.L., Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Petelin M.I., Strelkov P.S., Relativistic gyrotrons and cyclotron autoresonance masers // Int. J. Electron. 1981. Vol.51, Iss.4, P. 541.
40. Destler W.W., Irwin K., Lawson W., Rodgers J., Segalov Z. Intense beam fundamental mode large-orbit gyrotron studies // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 66, Iss. 9
41. Black W.M., Gold S.H., Fliflet A.W., Kirkpatrick D.A., Manheimer W.M., Lee R.C., Granatstein V.L., Hardesty D.L., Kinkead A.K., Sucey M. Megavolt, multikiloamp Ka band gyrotron oscillator experiment // Phys. of Fluids B: Plasma Phys. 1990. Vol.2 Iss. 1.
42. Radack D.J., Ramaswamy K., Destler W.W., Rodgers J. A fundamental mode, high-power, large-orbit gyrotron using a rectangular interaction region // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73, Iss. 12, P.8139.
43. Yang W., Zhou X., Yong X., et al. Experimental study on a high power microwave amplifier driven by low rf power // Acta Phys. Sin. 2011. Vol. 60, № 4. P. 44102.
44. Zhenbang L., Hua H., Xiao J, Yu. Zhao, He H., Lei L., Chen Zh. High power operation of an X-band coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. P. 113101.

45. Liu Z., Huang H., Lei L., Jin X., Zhu L., Wang G., He H., Wu Y., Ge Y., Yuan H., Chen. Zh. Investigation of an X-band gigawatt long pulse multi-beam relativistic klystron amplifier // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22, № 9.
46. Shiffler D., Ivers J.D., Kerslick G.S., Kerslick G. S. A Two Stage High-power Traveling-Wave Tube Amplifier // Appl. Phys. Lett. 1991. V.58. P.899.
47. Волков А.Б., Зайцев Н.И., Иляков Е.В.и др. Реализация высокого усиления в мощном СВЧ усилителе с взрывоэмиссионной пушкой // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, №12. С. 6.
48. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fuchs M.I., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Petelin M.I., Saveliev A.V., Schamiloglu E., Soluyanov E.I., Yastrebov V.V. X-Band Gigawatt Amplifier // IEEE Trans. on Plasma Science. 2002. V.30, №.3. P.1041-1051.